

разработали новый метод построения изолинейных карт, основанный на фундаментальной теореме Пуанкаре «О возвращаемости» и исследуют возможности данного метода на примере построения линий изобар.

Л и т е р а т у р а

1. **Гаджиев Ч. М., Садыхов Р. А.** А-оптимальный план размещения оконтуривающих скважин при разведке нефтяных месторождений // Измерительная техника. 2000. № 3. С. 20–24.
2. **Троян В. Н., Соколов Ю. М.** Методы аппроксимации геофизических данных на ЭВМ. Л.: ЛГУ, 1989.
3. **Садыхов Р. А.** Математические модели и эффективные алгоритмы решения оптимальных задач АСУ ТП добычи нефти: Автореф. дис. на соиск. учен. степ. докт. техн. наук. 1995.
4. **Пашаев А. М., Садыхов Р. А., Рамазанов Ф. Г., На-**

зирли Ф. С. Восстановление параметров геополей с учетом шумов измерений. Ч.1. Методы сглаживания, фильтрации и регуляризации // Измерительная техника. 2010. № 8. С. 3–11.

5. **Грановский В. А., Сирая Т. Н.** Методы обработки экспериментальных данных при измерениях. Л.: Энергоатомиздат, 1990.

6. **Гилл Ф., Мюррей У., Райт М.** Практическая оптимизация. М.: Мир, 1985.

7. **Завьялов Ю. С., Квасов Б. Н., Мирошниченко В. Л.** Методы сплайн-функций. М.: Наука, 1980.

8. **Стольниц Э., Де Роуз Т., Салезин Д.** Вейвлеты в компьютерной графике. Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая графика», 2002.

9. **Васильев Ф. П.** Численные методы решения экстремальных задач. М.: Наука, 1988.

Дата принятия: 04.04.2017.

621.3.088

Результаты наблюдений за навигационными космическими аппаратами на особых участках орбиты

**О. В. ДЕНИСЕНКО¹, В. Н. ФЕДОТОВ¹, В. Л. ВОРОНОВ¹,
В. С. РЫЖОВ², А. С. ЗАВГОРОДНИЙ¹, И. В. РЯБОВ¹**

¹Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, г.п. Менделеево, Московская обл., Россия,
e-mail: zavgor@vniiftri.ru

²Научно-исследовательский институт радиоэлектронной техники Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Получены результаты измерений мощности радионавигационных сигналов при прохождении навигационными космическими аппаратами особых участков орбит. В результате измерений обнаружены перепады уровня мощности, вызванные, возможно, изменением ракурса наблюдений навигационных космических аппаратов. Приведены результаты наблюдений за навигационными космическими аппаратами с использованием разных антенных систем. Полученные данные хорошо согласуются.

Ключевые слова: глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС), мощность сигнала, особые участки орбиты.

The radionavigation signal power measurement results when the navigation satellites pass the special orbit sections are obtained. Power level shifts were detected, caused, apparently, by a change in the viewing angle of the satellite. The joint observations by means of different antenna systems were carried out. The data is in good agreement.

Key words: global navigation satellite systems (GNSS), signal power, special orbit sections.

Метрологическое обеспечение глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) – актуальная задача современной метрологии. С применением технологий ГНСС в различных отраслях экономики возрастает важность метрологического обеспечения и оперативного контроля основных характеристик навигационных систем.

На качество работы аппаратуры, использующей радио-

навигационные сигналы в различных целях (от радионавигационных определений в геодезии до контроля толщины снежного покрова и решения задач локации [1, 2]), влияет множество факторов. Важнейшие среди них – энергетические характеристики навигационного сигнала. Согласно интерфейсному контрольному документу [3] уровень мощности сигнала при приёме линейно-поляризованной антенной с ко-

эффицентом усиления 3 дБ должен составлять $-161...-155$ дБВт. Такие малые уровни мощности могут быть измерены только с применением специализированных измерительных комплексов.

Во ВНИИФТРИ создан специализированный метрологический комплекс оценки энергетических характеристик (МК ОЭХ) для решения измерительных задач такого типа, а также для метрологического обеспечения подобных измерительных комплексов [4]. Основу МК ОЭХ составляет крупноапертурная зеркальная антенная система (диаметр первичного рефлектора 12 м), комплект прецизионной приёмной аппаратуры, а также программное обеспечение управления и обработки измерений. Крупноапертурная антенная система решает задачи пространственной селекции сигналов одного навигационного космического аппарата (НКА) и помех приземного слоя, а также усиливает сигнал до необходимых метрологически обеспеченных уровней мощностей, измеряемых прецизионной радиотехнической аппаратурой. Полный коэффициент усиления антенной системы МК ОЭХ (вместе с высокочастотным трактом) составляет не менее 85 дБ в диапазонах частот L1, L2, L3. Оценка абсолютной погрешности измерений мощности радионавигационных сигналов находится в пределах $\pm(0,8...1)$ дБ [4, 5], погрешность измерения отношения мощностей в динамическом диапазоне МК ОЭХ по результатам испытаний – в пределах $\pm 0,2$ дБ. Также с использованием аппаратуры МК ОЭХ измеряются спектральные и временные характеристики радионавигационных сигналов, в частности проводится квадратурная демодуляция навигационного сигнала, определяются характеристики сигнального созвездия, а также измеряется мощность открытого сигнала отдельно от всей совокупности сигналов НКА [6].

Регулярные измерения мощности радионавигационных сигналов НКА проводятся во ВНИИФТРИ с конца 2015 г. В результате исследований различных алгоритмов наведения и сопровождения НКА был выбран наиболее целесообразный, подразумевающий наведение антенной системы с опережением и измерений с неподвижной антенной. Такой подход позволяет проводить измерения с усреднением на протяжении следования аппарата через неподвижную диаграмму направленности антенной системы комплекса, а также позволяет экономить ресурс её приводов. Также было принято решение отказаться от оперативной, но однократной (точечной) оценки энергетических характеристик всех НКА и перейти к длительным сеансам слежения за каждым аппаратом (на всей протяжённости его видимости). Длительное наблюдение за НКА позволяет не только снизить влияние помех, но и получить информацию об угломестной зависимости мощности радионавигационного сигнала, а также измерить сечение диаграмм направленности антенно-фидерной системы (АФС) НКА. На основе таких данных можно получить модели трёхмерной диаграммы направленности

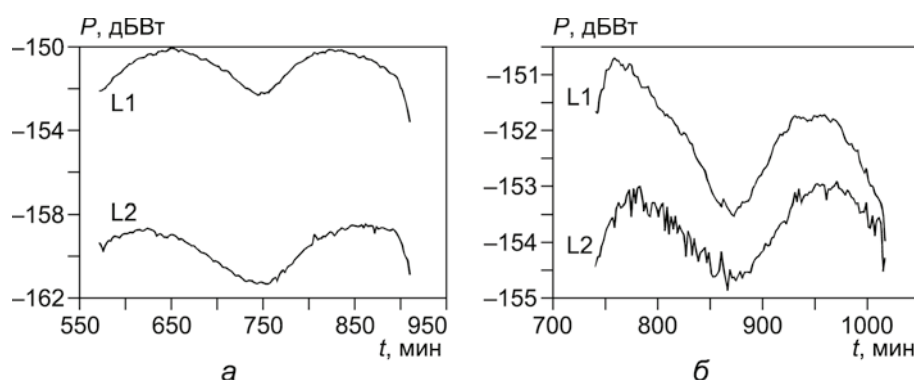


Рис. 1. Результаты измерений мощности P радионавигационных сигналов НКА 732 (R23) 28 августа 2017 г. (а) и НКА 743 (R08) 4 сентября 2017 г. (б) в диапазонах частот L1, L2; t – время наблюдений (от начала суток)

бортовых антенн НКА. Типичные результаты сеанса измерений приведены на рис. 1.

В результате обработки (нормировки и учёта поглощения атмосферы) результатов измерений получены фрагменты сечений диаграмм направленности бортовых АФС в диапазонах частот L1, L2 в плоскости линии визирования аппарата. Графики на рис. 1, а свидетельствуют о симметричной форме сечения диаграммы направленности относительно положения траверза, быстрый спад графика в правой части (угол места $\varphi < 8^\circ$) объясняется влиянием местных строений, ограничивающих видимость аппарата. Графики на рис. 1, б свидетельствуют об асимметрии формы диаграммы направленности АФС НКА в диапазоне L1. Возможные причины такой асимметрии: неодинаковое питание элементов антенной решётки излучателя; неточная ориентация НКА; старение элементов антенно-фидерных трактов НКА.

Таким образом, в результате длительных наблюдений были обнаружены формы сечений диаграммы направленности с нарушением симметрии относительно точки максимального возвышения. Форма измеряемого на Земле сечения диаграммы направленности может зависеть от взаимного расположения НКА и пункта наблюдения. Совместно со специалистами МГТУ им. Н.Э. Баумана были установлены периоды, когда НКА проходят так называемые особые участки орбиты [7], на которых происходит быстрое изменение положения НКА. Особыми были названы те участки орбиты НКА, которые пересекаются линией «Солнце – центр масс Земли» (или эта линия проходит в пределах единиц долей градуса). Для каждой орбитальной плоскости ГНСС «ГЛОНАСС» это происходит дважды в год. Эти изменения, по-видимому, заключаются в повороте корпуса НКА вокруг оси, направленной на центр масс Земли [8]. При условии симметрии диаграммы направленности бортового АФС такой поворот не должен влиять на уровень мощности радионавигационного сигнала, а в случае асимметрии такой поворот может быть замечен с поверхности Земли как перепад уровня мощности принимаемых сигналов. Причём значение перепада должно свидетельствовать о мере асимметрии сечения диаграммы направленности. Поскольку время такого поворота невелико (7–10 мин), то условия распространения

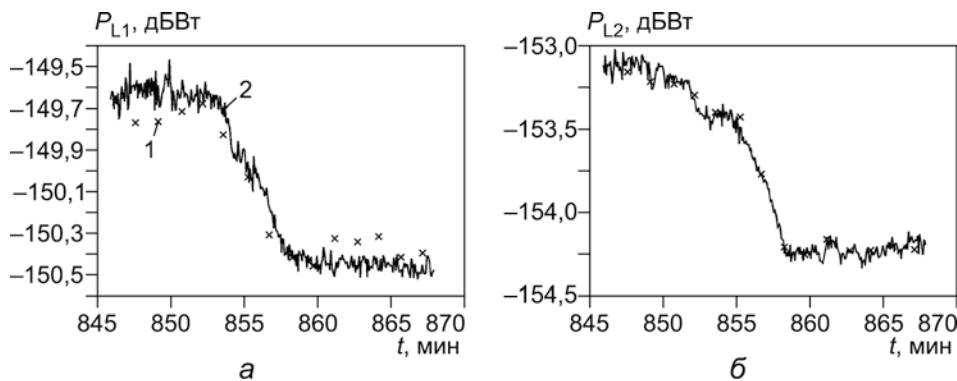


Рис. 2. Результаты совместных измерений мощности радионавигационных сигналов в диапазонах частот L1 P_{L1} (а) и L2 P_{L2} (б) НКА 755 (R21) при прохождении особого участка орбиты 8 июня 2017 г.:

1 – МК ОЭХ; 2 – радиотелескоп РТ-7,5; t – время наблюдений (от начала суток)

навигационного сигнала для измерений энергетических характеристик можно считать неизменными. По этой причине можно перейти от абсолютных измерений мощности к измерениям отношения мощностей.

Для подтверждения этой гипотезы специалистами ВНИИФТРИ и НИИ РЭТ МГТУ им. Н. Э. Баумана 7–8 июля 2017 г. была проведена серия совместных измерений мощности сигналов НКА ГНСС «ГЛОНАСС» третьей орбитальной плоскости, которые в этот период проходили особые участки орбиты. Измерения производили одновременно с применением аппаратуры МК ОЭХ (ВНИИФТРИ) и радиотелескопа РТ-7,5 (НИИ РЭТ МГТУ им. Н. Э. Баумана). Малый разброс данных совместных измерений показан на рис. 2. Расхождение кривых не превосходит пределов погрешности измерений отношения мощностей $\pm 0,2$ дБ. Одинаковые временные зависимости мощностей сигналов, измеряемых двумя комплексами, позволяют говорить о регистрации изменений, связанных с НКА, а не с измерительной аппаратурой на Земле. Также эти результаты подтверждают правомерность гипотезы о влиянии асимметрии формы амплитудной

диаграммы направленности относительно продольной оси спутника на изменение мощности радионавигационного сигнала на особых участках орбиты. Приведённый на рис. 2 перепад уровня мощности составляет около 0,5 дБ в диапазоне частот L1 и около 1 дБ в диапазоне частот L2. При наблюдении за НКА ГНСС «ГЛОНАСС» второй орбитальной плоскости в период 12–14 июля 2017 г. также были обнаружены сравнительно быстрые перепады мощности радионавигационных сигналов, которые могут объясняться прохождением НКА особых участков орбиты.

Также заметна разница зависимостей мощности сигнала от угла места до и после прохождения НКА особых участков орбиты.

На рис. 3 приведены результаты наблюдений НКА 702K (R09) до и после прохождения им такого участка. На графике показано практически зеркальное изменение формы сечения относительно положения траверза. Возможно, это означает поворот НКА вокруг оси, направленной на центр масс Земли. Иными словами, до прохождения аппаратом особенного участка орбиты он наблюдался под одним ракурсом и измерялось одно определённое сечение диаграммы направленности бортовой АФС, а после прохождения особенного участка орбиты ракурс изменился и измеряется другое сечение диаграммы направленности. Разница уровней мощностей сигнала до и после поворота составляет до 0,5 дБ.

Обнаруженный эффект не является уникальным для НКА ГНСС «ГЛОНАСС». Согласно зарубежным данным, например [9], при измерениях диаграмм направленности бортовых АФС НКА ГНСС GPS разница уровней сигналов до и после прохождения точки максимального возвышения может составлять единицы децибел.

Обнаруженные эффекты требуют продолжения исследований с привлечением информации о баллистике и угловой ориентации НКА. В настоящее время особенное внимание уделяется наблюдениям за теми НКА, орбиты которых содержат или вскоре (заранее на одну – две недели) будут содержать особый участок. Направлениями дальнейшей работы коллективов являются улучшение метрологических характеристик измерительных комплексов, а также совершенствование методик измерений энергетических, спектральных и временных характеристик радионавигационных сигналов в целях метрологического обеспечения ГНСС «ГЛОНАСС».

Л и т е р а т у р а

1. Михайлов М. И., Музалевский К. В., Миронов В. Л. Измерение толщины льда на пресноводном пруде и реке с использованием сигналов ГЛОНАСС и GPS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.

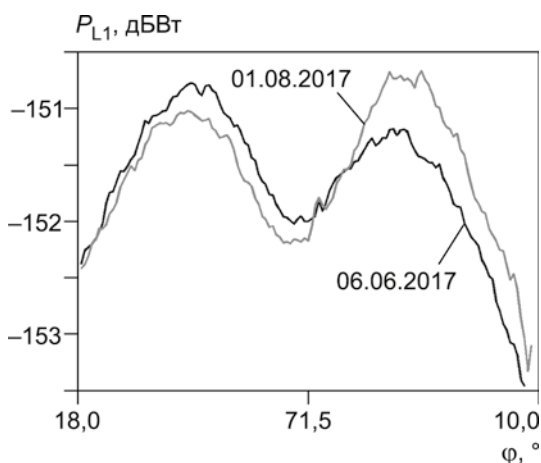


Рис. 3. Результаты измерений мощности P_{L1} радионавигационного сигнала НКА 702K (R09) в диапазоне L1; φ – угол места

2017. Т. 14. № 2. С. 167–174. [Электрон. версия] http://d33.infospace.ru/d33_conf/sb2017t2/167-174.pdf (дата обращения: 30.08.2017).

2. **Киришкин В. В., Черепанов Д. А.** Бистатистическая локация воздушных целей сигналами спутниковых радионавигационных систем // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2010. № 11 (6). С. 33–38.

3. **Глобальная** навигационная спутниковая система ГЛОНАСС. Интерфейсный контрольный документ. Версия 5.1. [Электрон. версия] <http://russianspacesystems.ru/wp-content/uploads/2016/08/IKD.-Obskh.-opis.-Red.-1.0-2016.pdf> (дата обращения: 17.01.2017).

4. **Завгородний А. С., Рябов И. В., Воронов В. Л.** Метрологический комплекс оценки энергетических характеристик сигналов навигационных космических аппаратов ГНСС «ГЛОНАСС» // Альманах современной метрологии. 2016. № 7. С. 124–138.

5. **Завгородний А. С.** О калибровке метрологического комплекса оценки энергетических характеристик сигналов навигационных космических аппаратов по полному коэффициенту передачи // Метрология в XXI веке: тез. докл. науч.-

практ. конф. молодых ученых, аспирантов и специалистов. 2 марта 2016 г., Менделеево. Менделеево: ВНИИФТРИ. 2016. С. 151–157.

6. **Завгородний А. С.** Метод компенсации смещения частоты принимаемого навигационного сигнала при измерениях мощности // Радионавигационные технологии: Сб. статей / Под ред. А. И. Перова. М.: Радиотехника, 2015. С. 97–101.

7. **Фатеев А. В., Емельянов Д. В., Тентиллов Ю. А., Овчинников А. В.** Прохождение особых участков орбиты навигационным космическим аппаратом системы ГЛОНАСС // Вестник СибГАУ. 2014. № 4 (56). С. 126–131.

8. **Информационно-справочный** портал Европейского Космического Агентства (ЕСА) «Навипедия». [Официальный сайт] http://navipedia.org/index.php/Carrier_Phase_Wind-up_Effect (дата обращения: 17.01.2017).

9. **Willard A. Marquis, Daniel L. Reigh.** The GPS Block IIR and IIR-M Broadcast L-Band Antenna Panel: Its Pattern and Performance // Navigation. 2015. V. 62 (4). P. 329–347.

Дата принятия: 30.10.2017.

ЛИНЕЙНЫЕ И УГЛОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

62.408.8

Методика вычисления нормируемых стандартами ISO функциональных параметров трёхмерной структуры шероховатости поверхности

Б. Н. МАРКОВ, П. Н. ЕМЕЛЬЯНОВ, А. В. ГЛУБОКОВ, А. В. ШУЛЕПОВ

Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»,
Москва, Россия, e-mail: pemelyan@rambler.ru

Предложена методика расчёта функциональных параметров трёхмерной структуры шероховатости поверхности с использованием программного комплекса Mathcad. Приведены результаты вычисления указанных функциональных параметров шероховатости рабочей поверхности концевой меры длины.

Ключевые слова: поверхность, шероховатость, параметры трёхмерной структуры шероховатости поверхности, оценка шероховатости, функциональные параметры.

The technique for calculating some three-dimensional functional parameters of surface roughness using the Mathcad software is proposed. The results of calculation of the three-dimensional functional parameters of the roughness of the working surface of the gauge-block are presented.

Key words: surface, roughness, roughness parameters, three-dimensional roughness value, three-dimensional functional parameters.

Международный стандарт ISO 25178 содержит 18 частей и посвящён анализу трёхмерной структуры шероховатости поверхности. В некоторых частях этого стандарта описаны отдельные методы измерения и рассмотрены вопросы терминологии,

нормирования параметров и классификации методов измерения. В России переведена только вторая часть этого стандарта [1]. В ISO [2] выделены следующие группы параметров, характеризующих трёхмерную структуру шероховатости поверхности: